

· 工艺技术 ·

## 高品质 GCr15 轴承钢 80 t 转炉-钢包炉精炼渣的研究

刘发友 徐志刚 尚明

(山东寿光巨能特钢有限公司, 寿光 262711)

**摘要** GCr15 轴承钢的冶炼流程为 80 t 顶底复吹转炉-LF 精炼-VD-180 mm × 220 mm 连铸工艺。研究了碱度 3~8 的 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaF<sub>2</sub>-MgO 精炼渣系对高品质 GCr15 轴承钢(∕% : 0.95~1.05C, 0.15~0.35Si, 0.25~0.45Mn, 1.40~1.65Cr, ≤0.025P, ≤0.025S, ≤0.001 2[O]) 冶金质量的影响。生产结果表明,采用碱度 5.8 的精炼渣(∕% : 50~55CaO, 6~12SiO<sub>2</sub>, 15Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 10CaF<sub>2</sub>, ≤0.5FeO, ≤8MgO) 可有效地降低钢中氧含量和夹杂物, GCr15 轴承钢的氧含量为 (5~9) × 10<sup>-6</sup>, 平均氧含量为 5.6 × 10<sup>-6</sup>, 硫含量达 0.005%~0.009%, 夹杂物 0~0.5 级。

**关键词** 高品质 GCr15 轴承钢 80 t 转炉 钢包炉 精炼渣 夹杂物

## A Study on 80 t Converter-Ladle Furnace Refining Slag for High Quality GCr15 Bearing Steel Steelmaking

Liu Fayou, Xu Zhigang and Shang Ming

(Shandong Shouguang Juneng Special Steel Co Ltd, Shouguang 262711)

**Abstract** Steelmaking flow sheet for GCr15 bearing steel is 80 t top and bottom combined blowing converter-LF refining-VD-180 mm × 220 mm CC process. The effect of CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaF<sub>2</sub>-MgO refining slag series with basicity 3~8 on metallurgy quality of high quality GCr15 bearing steel (∕% : 0.95~1.05C, 0.15~0.35Si, 0.25~0.45Mn, 1.40~1.65Cr, ≤0.025P, ≤0.025S, ≤0.001 2[O]) is studied. Commercial production results show that with using 5.8 basicity refining slag (∕% : 50~55CaO, 6~12SiO<sub>2</sub>, 15Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 10CaF<sub>2</sub>, ≤0.5FeO, ≤8MgO), it is available to decrease the oxygen content and inclusions in steel, the oxygen content in GCr15 bearing steel is (5~9) × 10<sup>-6</sup>, average oxygen content is 5.6 × 10<sup>-6</sup>, the sulphur content in steel is 0.005%~0.009%, and the rating of inclusion in steel is 0~0.5.

**Material Index** High Quality, GCr15 Bearing Steel, 80 t Converter, Ladle Furnace, Refining Slag, Inclusion

随着我国机械工业的发展,GB/T18254-2002 轴承钢对质量的要求更为严格,纯净度控制是冶炼轴承钢的重要控制环节。山东寿光巨能特钢有限公司为满足市场需要,继采用电弧炉生产轴承钢之后,又开发转炉生产轴承钢。因 LF 精炼炉渣的成分控制对钢水的纯净度有着直接的影响,寿光巨能特钢设计了合理的转炉钢包精炼渣成分,有效地减少钢水中的硫化物、氧化物等夹杂,明显提升轴承钢的品质,并达到了年产 20 万 t 高品质转炉轴承钢的产能。

### 1 工艺流程

80 t 顶底复吹转炉-LF 钢包精炼-VD-R12m 5 机 5 流连铸-180 mm × 220 mm 铸坯精整-Φ550 mm × 4 机 + Φ450 mm × 2 机列精轧。

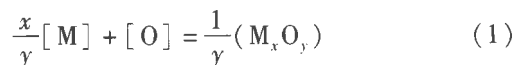
### 2 理论基础

#### 2.1 脱氧脱硫机理

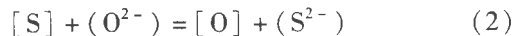
研究钢包炉精炼渣的冶金特性,目的是使轴承钢在钢包内脱硫、脱氧,减少非金属夹杂物,缩短处理时间,提升钢水质量。

钢水脱氧的反应需在还原气氛下进行,脱氧的

过程为钢水中的氧元素与炉中添加的活泼金属、金属混合物等形成低密度的氧化物夹杂,辅以吹氩等手段使氧化物上浮于钢水表面。脱氧反应基本方程如式(1)。



钢水脱硫的反应也需在还原气氛下进行,脱硫的过程为钢水中的硫元素与渣中的 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 形成稳定的硫化物,硫化物在渣中被吸附和去除。脱硫反应基本的离子方程如式(2)。



#### 2.2 精炼渣的组分及作用

LF 精炼渣要求具有良好的脱硫性和对钢中非金属夹杂物的粘附性,避免或减少对钢包衬的侵蚀,有相对低的熔点和热容性,并具有良好的透气性。

LF 精炼主要采用 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> 三元碱性渣作为精炼渣,精炼渣的主要组分为 CaO、SiO<sub>2</sub>、MgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaF<sub>2</sub> 等。在精炼渣的各组分中,CaO、MgO 的

主要作用为调节渣的碱度,并起到脱硫的作用,MgO 还可以保护包衬,当 MgO 在渣中 <5% 时渣的粘度较小,当 MgO 在渣中 >8% 时渣的粘度较大;SiO<sub>2</sub> 的主要作用为调节渣的碱度和粘度,提高发泡性能,改善流动性;Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的主要作用为调整 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 三元系渣处于低熔点位置,CaF<sub>2</sub> 的主要作用为降低渣的粘度。良好的精炼渣一般控制其熔点为 1 300 ~ 1 450 °C,控件其粘度在 0.25 ~ 0.6 Pa·s。

### 3 精炼渣研制

#### 3.1 精炼渣成分分配比

根据钢铁冶金原理,在 1 600 °C,由 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> 系中 CaO 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的活度情况<sup>[1]</sup>可以看出,当 10% ~ 20% (SiO<sub>2</sub>) 和 50% ~ 70% (CaO) 的 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> 渣中,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 活度波动在 0.01 ~ 0.5,在此浓度范围内硫化物容量  $C_s = 5 \sim 35 \times 10^{-3}$ <sup>[2,98]</sup>。利用 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 活度 0.5、硫化物容量  $C_s$  以及 1 550 °C 铝脱氧平衡常数  $K_{Al}$  就可以算出硫分配比。根据钢铁冶金学中 1 550 °C,钢水与含 13% (SiO<sub>2</sub>) 的 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> 渣之间硫的分配比随渣中 CaO 含量和钢水中 Al 含量的变化<sup>[2,101]</sup>,并结合生产实践配制精炼渣,设计 3 种合成渣成分的方案见表 1。

表 1 精炼合成渣和碱度

Table 1 Ingredient of refining synthetic slag and basicity

方案	成分/%						碱度
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaF <sub>2</sub>	FeO	MgO	
I	52	9	15	10	≤0.5	≤8	5.8
II	48	16	15	10	≤1.0	≤8	3.0
III	56	7	15	10	≤0.8	≤8	8.0

#### 3.2 生产试验

将本渣系应用于生产中,在 80 t 转炉出钢过程中按 10 ~ 15 kg/t 加入精炼渣,并根据生产情况进行人工加入 100 ~ 300 kg CaO、CaF<sub>2</sub> 进行调渣。

在 80 t 转炉出钢过程中按 1 kg/t 加入钢芯铝锭。

根据钢中氧含量和铝含量的关系,当钢中含 0.02% 的铝,在炼钢温度下 (1 600 ~ 1 650 °C) 与之平衡的钢中的 [O] 是 0.000 5% ~ 0.000 8%,因此精炼全程控制铝在 0.02% 以上。

中等颗粒的夹杂物在钢液中的上浮速度很慢,并且 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 熔点很高,在钢液中为固体,不能聚合长大,钢液中的夹杂物靠自然上浮是很困难的,因此全程采用足够的氩气搅拌以改善动力学条件,使夹杂物聚集上浮,达到去除夹杂物降低氧含量的目的。

在精炼炉冶炼过程中,钢液中的氧和熔渣中的 FeO 处于动态平衡,当对精炼渣进行扩散脱氧时,渣中 FeO 减少,则钢液中 [O] 向渣中扩散,相当于对钢液脱氧。反之渣中 FeO 向钢液中扩散,钢液被氧化。因此为了保证熔渣的还原性,必须降低渣中 ΣFeO 的含量 (一般控制在 0.5% ~ 1.0%)。为此需分期分批地向熔渣中加入脱氧剂<sup>[3]</sup>。

选用电石和碳化硅做为熔渣扩散脱氧用的脱氧剂,同时使精炼渣起到了发泡、埋弧、降低电耗和保温的作用。

精炼后软吹氩 15 ~ 30 min,吹氩流量 50 ~ 100 L/min,吹氩搅拌能量  $E$  选择 80 J/t × 10<sup>-3</sup>。功率选择 25 kWh/t,升温速度 3 ~ 5 °C/min。

VD 真空处理,控制真空度 67 Pa 以下,保持 10 min。

连铸采用密封水口保护浇注,由 R12 5 机 5 流连铸机生产出 180 mm × 220 mm 的连铸坯。

经 Φ650 mm × 1 机列粗轧 → 160 t 热剪切头 → Φ550 mm × 4 机 + Φ450 mm × 2 机列精轧 → Φ 1 500 mm 热锯 → 冷床 → 收集 → 坑冷,生产 Φ60 mm 轴承钢。

#### 3.3 试验结果及分析

根据精炼渣成分的 3 种方案和以上生产工艺分别试制 10 炉钢,试验过程成分及最终成品材的成分检测结果见表 2。

表 2 转炉出钢时 [S]、精炼后成品的化学成分、脱硫率和钢材中平均氧含量

Table 2 [S] at converter tapping, analysis of steel after refining, desulphurization rate and average oxygen content in products

方案	炉号	化学成分/%								平均脱硫率/%	钢材平均氧含量/10 <sup>-6</sup>
		[转]S	[成]C	[成]Si	[成]Mn	[成]P	[成]S	[成]Cr	[材]O		
I	0201050 ~ 0201059	0.029 ~	0.97 ~	0.24 ~	0.36 ~	0.010 ~	0.005 ~	1.51 ~	0.000 5 ~	82.21	5.6
		0.040	1.01	0.27	0.39	0.018	0.009	1.54	0.000 9		
II	0201072 ~ 0201081	0.020 ~	0.97 ~	0.23 ~	0.36 ~	0.009 ~	0.007 ~	1.51 ~	0.000 6 ~	71.32	9.6
		0.045	1.00	0.26	0.38	0.020	0.014	1.54	0.001 1		
III	0201120 ~ 0201129	0.026 ~	0.97 ~	0.23 ~	0.36 ~	0.009 ~	0.009 ~	1.50 ~	0.000 5 ~	60.22	9.7
		0.041	1.02	0.28	0.38	0.015	0.014	1.56	0.001 1		

通过表 2 可以看出,采用不同方案试制生产的产品检验结果都能合格,与转炉硫含量相比,LF 之后硫含量明显降低,氧含量低于国家标准 GB/T18254-2002 中对氧含量低于  $12 \times 10^{-6}$  的要求<sup>[4]</sup>。然而经过不同方案的对比可以看出 3 种渣成分的优劣程度。

由表 2 比较可知,脱硫效果从优到劣的顺序依次为方案 I、II、III,方案 I 的平均脱硫率达到了 82% 以上,主要原因是方案 I 的成分设计既满足了脱硫反应的充分进行,又保证了渣的熔点、粘度,而方案 II 控制精炼渣碱度较低,不利于脱硫的充分进行,方案 III 控制精炼渣碱度过高,不利于渣的发泡,影响反应的动力学条件。

对生产试制的 3 种方案共 30 炉钢,经相同连铸、轧制工艺,生产  $\Phi 60$  mm 轴承钢棒材成品,检测氧含量和非金属夹杂物,材中氧含量的检测结果见表 2,不同方案下每炉次材中氧含量分布见图 1。

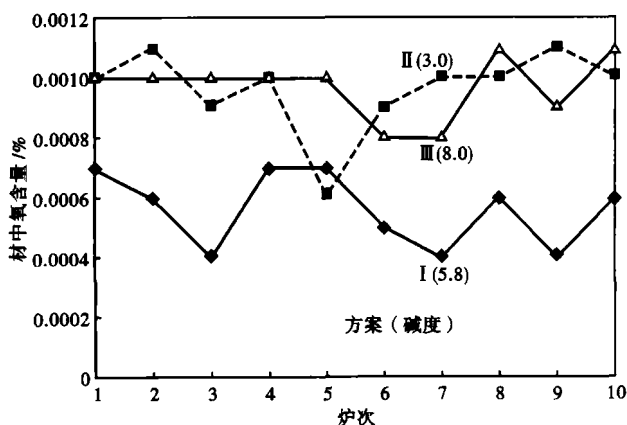


图 1 精炼渣碱度对 GCr15 轴承钢材中氧含量的影响  
Fig. 1 Effect of refining slag basicity on oxygen content in GCr15 steel products

根据表 2 中的氧含量数据,做出钢材中的氧含量分布图(图 1)。从图 1 中可以看出,方案 I 和方案 II 中炉渣对氧的控制水平明显优于方案 III,然而方案 I 和方案 II 存在较大的波动,同时方案 I 的波动趋势要大于方案 II,方案 III 控制氧含量的水平最稳定,但却处于一个较高的水平。综合而言,方案 I 为控氧的最佳方案,其控制过程因受外界难以消除的干扰因素影响,故其在控制氧含量方面还波动,但在以上 3 种方案中,最优方案为方案 I。

计算得知(表 2),方案 I、II、III 的平均氧含量分别为  $5.6 \times 10^{-6}$ 、 $9.6 \times 10^{-6}$ 、 $9.7 \times 10^{-6}$ ,方案 I 达到一个超低氧的控制水平。主要原因是采用活泼金

属或金属混合物充分脱氧后形成的氧化物夹杂,在充分被方案 I 所设计的渣中的 CaO、SiO<sub>2</sub> 等成分形成的熔渣吸附,吸附效果最佳,吸附氧化物夹杂之后进行了充分的扩散脱氧,进一步降低了钢中的氧含量。而方案 II 和方案 III,因其设计的碱度较低或较高,影响了渣的发泡和吸附效果,不利于氧化物夹杂的吸附,也不利于渣液之间的扩散脱氧。采用 3 种方案试制的轴承钢中非金属夹杂物的检测结果见表 3。

表 3 3 种精炼合成渣对钢中非金属夹杂物的影响/级  
Table 3 Effect of three kinds of refining synthetic slag on nonmetal inclusions in steel products /rating

方案	A		B		C		D	
	粗	细	粗	细	粗	细	粗	细
I 最大	0.5	0.5	0.5	0	0.5	0.5	0	0.5
II 最大	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0.5
III 最大	1.5	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0.5

由表 3 可以看出,方案 I 的硫化物、氧化物控制水平明显高于方案 II、方案 III,主要原因是通过合理的精炼渣成分设计,充分降低了钢中的硫含量和氧含量的水平,硫化物、氧化物形成的机率变小。

#### 4 结论

(1) 经过理论分析和工业性试验, ( $\%$ ) 50 ~ 55CaO、6 ~ 12SiO<sub>2</sub>、11 ~ 19Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、8 ~ 10CaF<sub>2</sub>、 $\leq 0.5$ FeO、 $\leq 8$ MgO 的精炼渣成分设计合理,具有较高的脱氧、脱硫和去除大颗粒夹杂物能力,使钢中平均氧含量达  $5.6 \times 10^{-6}$ ,脱硫率 80% 以上。

(2) 通过采用本渣系,使用铝脱氧并辅以电石、碳化硅扩散脱氧优化工艺,可以冶炼出符合 GB/T18254-2002 标准的超低硫、超低氧的高品质转炉轴承钢。

#### 参考文献

- [1] 黄希祜. 钢铁冶金原理(第 3 版)[M]. 北京:冶金工业出版社, 2002:190.
- [2] 奥特斯 F. 钢冶金学[M]. 倪瑞明,张圣弼,项长祥译. 北京:冶金工业出版社,1997:98.
- [3] 黄希祜. 钢铁冶金原理(第 2 版)[M]. 北京:冶金工业出版社, 1990:218.
- [4] GB/T18254-2002,高碳铬轴承钢[S]

刘发友(1970-),男,硕士,高级工程师,辽宁科技大学冶金工程专业,钢铁冶金研究。

收稿日期:2012-07-29